中国生态农业学报 2016 年 6 月 第 24 卷 第 6 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Jun. 2016, 24(6): 790−800

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.151284

应用 AMMI 和 HA-GGE 双标图分析甘蔗品种产量稳定性和试点代表性*

汪洲涛 苏炜华 阙友雄 许莉萍 张 华 罗 俊**

(福建农林大学农业部福建甘蔗生物学与遗传育种重点实验室 福州 350002)

摘 要 对甘蔗区域试验数据进行基因型与环境互作分析，有利于全面了解参试品种的丰产性和各试点的代表性，对优良新品种的推广和品种的区域分布也有着重要意义。本文综合利用 AMMI 模型和 HA-GGE 双标图对 2014 年国家甘蔗第 10 轮区域试验 11 个品种和 13 个试点的蔗茎产量和蔗糖产量数据进行产量稳定性和丰产性分析，评价试点的代表性和分辨力。结果表明：蔗茎产量和蔗糖产量在不同品种和试点间存在极显著差异，品种和试点存在极显著互作效应。‘福农 40 号’综合表现最佳，是产量高、丰产性好且蔗茎产量和蔗糖产量的稳定性均较强的品种；‘云蔗 08-2060’的产量略低于‘福农 40 号’，但蔗茎产量和蔗糖产量的稳定性强于‘福农 40 号’；与对照品种‘ROC22’相比，‘粤甘 43 号’、‘粤甘 46 号’和‘闽糖 02-205’的蔗茎产量和蔗糖产量较高，稳定性中等，‘福农 40 号’、‘粤甘 43 号’、‘粤甘 46 号’和‘云蔗 08-2060’均具有较强的适应性，可在适宜蔗区推广应用。综合 AMMI 和 HA-GGE 双标图分析结果表明，广东遂溪、云南开远和福建福州具有较高的地点分辨力和试点代表性。因此，AMMI 和 HA-GGE 双标图的综合运用，可更准确直观地评价出各品种的丰产性、稳定性和适应性以及各试点的分辨力和代表性。本研究可为甘蔗新品种的鉴定与推广提供有价值的理论参考。

关键词 甘蔗 区域试验 AMMI 模型 HA-GGE 双标图 蔗茎产量 蔗糖产量 稳定性 代表性
中图分类号: S566.103.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2016)06-0790-11

Analysis of yield stability and test site representativeness of sugarcane trials using combined AMMI and HA-GGE biplot models*

WANG Zhoutao, SU Weihua, QUE Youxiong, XU Liping, ZHANG Hua, LUO Jun**

(Key Laboratory of Sugarcane Biology and Genetic Breeding, Ministry of Agriculture, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China)

Abstract Knowledge on yield stability of sugarcane varieties and representativeness of test sites during national regional trials of sugarcane varieties is critical for rationally regional distribution and guiding sugarcane breeding. Additive main effects and multiplicative interaction (AMMI) and heritability adjusted GGE (HA-GGE) biplot models are the two widely used statistical methods in analyzing data on crop variety trials. Using experimental data from regional trials, the interactions between crop genotype and environment can be analyzed to determine yield potential of tested varieties and representativeness of pilots. In order to assess the representativeness and discrimination ability of 13 test locations of sugarcane variety trail, the AMMI model was used in combination with HA-GGE bipliot to analyze cane and sugar yields of 11 sugarcane varieties planted at 10 national regional trial sites of sugarcane varieties in China. The results showed that cane and sugar yields were significantly different for different varieties and test sites. There was significant interaction effect between variety and test site. The ‘FN40’ sugarcane variety had the best performance, with high yield, good productivity and high stability of cane yield and

* 国家现代农业产业技术体系建设项目(CARS-20)和公益性行业(农业)科研专项(201503119)资助
** 通讯作者: E-mail: sisluojun@126.com
收稿日期: 2015−12−01 接受日期: 2016−02−01

* Supported by the China Modern Agriculture Research System Construction Project (CARS-20) and the Special Fund for Agro-scientific Research in the Public Interest (201503119)
** Corresponding author, E-mail: sisluojun@126.com
Received Dec. 1, 2015; accepted Feb. 1, 2016

sugar yield. The yield of 'YZ08-2060' sugarcane variety was slightly lower than that of 'FN40', while the stability of its cane and sugar yields was slightly higher than that of 'FN40'. Compared with 'ROC22' variety, 'YG43', 'YG46' and 'MT02-205' had higher cane and sugar yields, but had lower stability. 'FN40', 'YG43', 'YG46' and 'YZ08-2060' had stronger adaptability, and were recommended for cultivation at suitable planting sites. The result further indicated that three test locations, Suixi of Guangdong Province, Kaiyuan of Yunnan Province and Fuzhou of Fujian Province, had higher discrimination and better representativeness based on comprehensive analysis of AMMI and HA-GGE biplot models. Here, two sugarcane varieties ('FN40' and 'YZ08-2060'), both with high yield and good stability, were recommended for commercial production in all sugarcane planting areas in China. In conclusion, the combined used of AMMI and GGE biplot model provided more accurate assessment for the productivity, stability and adaptability of sugarcane varieties. It was also very reliable in terms of demonstration of discrimination and representativeness of test sites. This study provided valuable reference base for the identification and promotion of new sugarcane varieties.

Keywords　Sugarcane; Regional trail; AMMI model; HA-GGE biplot; Cane yield; Sugar yield; Stability; Representativeness

作物品种区域试验(简称区试)是指在不同生态类型区域，选择能够代表该地区气候、土壤、温湿度、光照等各种农业生产环境的地点，采用相同的试验方案和统一的技术规程评价品种的丰产性、稳产性、适应性、抗性、品质等各种农艺性状以及试验地点的代表性等。通常一个理想的区域试验，不仅要能够区分出不同基因型作物品种之间的遗传差异，筛选出优异品种，还能够确定各参试品种的最佳适应区域[1−5]。因此，通过科学合理的区域试验，能够不断地适时推出适合全国或适应某个区域种植的作物新品种，有利于避免品种单一化及其造成的农作物种植过程中的种种问题[6−7]。农作物区域试验中，不同试点的气候和土壤条件等生态因子不同[8−10]，对应地各个品种在不同试点的表现也会有不同程度的差别，这正体现了作物品种的实际性状表现是由基因和环境共同决定的。基因型(G)与环境(E)的互作效应(G×E)的准确评估是合理评价品种稳定性和适应性的关键。近年来，很多学者提出多种不同的数学分析方法，如：线性分析、非线性分析和主成分分析等，但对“品种×环境”互作效应的分析上都有失偏颇，难以准确把握。本研究期望通过联合采用AMMI模型和GGE双标图模型，能够在一定程度上弥补这一缺陷。

AMMI模型已经广泛应用于对多试点多品种的G×E交互作用的分析，如：糜子(*Panicum miliaceum*)[3]、小麦(*Triticum aestivum*)[11−12]、水稻(*Oryza sativa*)[13]、油菜(*Brassica campestris*)[14]和甘蔗(*Saccharum officinarum*)[15−16]等。该模型将主成分分析与方差分析相结合，从加性模型互作项中分离出若干个乘积项之和来提高估计的准确性，借助双标图和互作效应值分析稳定性、适应性和G×E互作[16−17]。

GGE双标图(GGE-Biplot)是研究基因型与环境互作以及作物品种产量稳定性和试点代表性的新方法[18−20]。此模型在多年多点的区域试验上是一个十分理想的分析工具[19−21]，应用GGE-Biplot可以揭示出错综复杂的不同因素之间的相互作用关系[20,22−24]，已经广泛被用来处理产量和品质的数据[25]。HA-GGE双标图是遗传力校正的GGE双标图[22]。HA-GGE双标图是分析基因型与环境互作模式、鉴别品种生态区和试点评价的有效方法，可根据试点对目标环境的代表性及其对基因型遗传差异的鉴别力来评价试点的理想程度[20]。目前Luo等[17]已开展HA-GGE双标图在甘蔗品种试验环境评价、品种多系布局等方面的应用研究。

不管是 AMMI 模型还是 HA-GGE 双标图模型，每个单一模型都会有自身的缺陷，例如 AMMI 模型方法重点考虑基因型与环境的互作效应，较少从品种选育和推广角度对基因型进行全面评价[26]，该模型依赖于双向数据，往往选择的是稳定高产或稳定低产的品种，一些高产但稳定性较差的品种受到忽略[27−28]，由于它并非是一个真正意义上的双标图，其应用受到了一些限制[29−30]。AMMI 模型适用于品种与环境互作分析，HA-GGE 双标图更适用于环境评价，综合利用 AMMI 模型和 HA-GGE 双标图，两种模型互补优缺，对分析结果进行比较综合，可挖掘一些高产但稳定性不高的品种在适宜区域应用，更有利于提高区试数据分析的科学性与准确性[27]，为品种多系布局筛选优异品种在适宜区域应用提供参考。

本研究综合采用 AMMI 模型和 HA-GGE 双标图分析 2014 年国家第 10 轮区试甘蔗品种基因型与环境互作模式，综合评价甘蔗品种的稳定性和试点的代表性，旨在为生产上进一步利用和推广甘蔗新品种提供更加科学的理论基础。

1 材料与方法

1.1 供试材料

试验数据来自国家第 10 轮甘蔗品种区域试验 2014 年度新植季试验，参试品种共 11 个，品种名称及代号依次分别为'ROC22'(G1)、'福农 07-2020'(G2, 'FN07-2020')、'福农 07-3206'(G3, 'FN07-3206')、'福农 40'(G4, 'FN40')、'赣蔗 07-538'(G5, 'GZ07-538')、'柳城 07-500'(G6, 'LC07-500')、'闽糖 02-205'(G7, 'MT02-505')、'粤甘 43'(G8, 'YG43')、'粤甘 46'(G9, 'YG46',)、'云瑞 07-1433'(G10, 'YR07-1433')、'云蔗 08-2060'(G11, 'YZ08-2060')，其中'ROC22'(G1)为对照品种；试点共 13 个，其中广西壮族自治区 4 个试点，云南省 4 个试点，广东省 2 个试点，海南省 1 个试点，福建省 2 个试点，各试点情况列于表 1。

1.2 试验设计

参试品种采用完全随机区组排列，4行区，3次重复，行长8 m，行距1.1 m，小区面积35.2 m^2。2月下旬至3月上旬种植，公顷下种量105 000个芽，及时中耕培土、施肥、排灌、防治虫害。收获前调查产量性状，从11月到第2年3月，每月中旬取样进行糖分化验，收获前进行实收测产。测产方法为每个小区将中间1行甘蔗进行称重实收[17,29]，按以下公式计算相关指标：

单位面积有效茎数(条·hm^{-2})=[样点有效茎数(条)/样点面积(m^2)]×666.7×15 (1)

蔗茎产量(t·hm^{-2})=样点产量(kg)/样点有效株数(条)×单位面积有效茎数(条·hm^{-2})/1 000 (2)

蔗糖产量(t·hm^{-2})=蔗茎产量(t·hm^{-2})×甘蔗蔗糖分(%) (3)

表 1 国家甘蔗品种区域试验 13 个试点的环境因子信息

Table 1 Basic information of 13 test locations in China sugarcane regional trials

试点 Location	代号 Code	经度 Longitude (E)	纬度 Latitude (N)	海拔 Altitude (m)	土壤类型 Soil type	年降雨量 Precipitation (mm)	年日照时数 Annual sunshine duration (h)	平均气温 Mean annual temperature (℃)
福建福州 Fuzhou, Fujian	E1	119.23	26.08	10.0	壤土 Loam	1 600	1 700	18.6
福建漳州 Zhangzhou, Fujian	E2	117.35	24.52	12.8	壤土 Loam	1 460	2 430	21.0
广东遂溪 Suixi, Guangdong	E3	110.25	21.23	50.0	沙壤土 Sandy loam	1 759	1 864	24.2
广东湛江 Zhanjiang, Guangdong	E4	110.26	21.16	22.0	砖红壤 Red loam	1 691	2 106	23.0
广西百色 Baise, Guangxi	E5	106.98	23.68	82.5	沙壤土 Sandy loam	1 100	1 448	21.0
广西河池 Hechi, Guangxi	E6	108.06	24.73	110.0	红壤 Red loam	1 500	1 696	20.2
广西来宾 Laibin, Guangxi	E7	109.08	23.76	95.0	沙壤土 Sandy loam	1 400	1 750	20.8
广西柳州 Liuzhou, Guangxi	E8	109.36	24.47	99.1	黄壤 Yellow soil	1700	1 570	20.0
海南临高 Lingao, Hainan	E9	109.69	19.92	20.0	砖红壤 Red loam	1 417	2 349	24.5
云南保山 Baoshan, Yunnan	E10	99.01	25.02	670.0	沙壤土 Sandy loam	1 000	2 307	21.3
云南开远 Kaiyuan, Yunnan	E11	103.25	23.7	1 055.0	沙壤土 Sandy loam	700	2 200	19.8
云南临沧 Lincang, Yunnan	E12	99.95	24.15	1 030.0	红壤 Red loam	1 200	2 257	19.6
云南德宏 Dehong, Yunnan	E13	97.87	24.24	980.0	沙壤土 Sandy loam	1 180	2 316	19.4

1.3 统计方法

1.3.1 AMMI 模型

利用 DPS V.14.10 软件统计分析性状的平均值和标准差[28]，并进行方差分析，在基因型与环境互作效应显著的基础上按 AMMI 模型进行稳定性分析，其数学模型为：

$$y_{ge} = \mu + \alpha_g + \beta_e + \sum_{n=1}^{N} \lambda_n \gamma_{gn} \delta_{en} + \theta_{ge} \qquad (4)$$

式中：y_{ge} 是在环境 e 中基因型 g 的产量；μ为总体平均值；α_g 是基因型平均偏差；β_e 是环境的平均偏差；λ_n 为第 n 个交互效应主成分分析轴(interaction principal component axis , IPCA)的特征值；γ_{gn} 是第 n 个主成分的基因型主成分得分；δ_{en} 是第 n 个主成分的环境主成分得分；N 是主成分轴的总个数；θ_{ge} 为残差[15−16]。取主成分效应达到显著水平的 IPCA 在多维空间离原点的距离作为基因型稳定性的评价指标，记为 D_i，D_i 值对品种和试点的意义是不同的，

就品种而言, 品种稳定性与 D_i 值呈反比, D_i 值越小品种稳定性越好; 对试点而言相反, D_i 值越大, 鉴别力越高, 呈正比关系。利用达到显著水平的主成分 D_i 值能准确判断甘蔗品种蔗茎产量的稳定性。

1.3.2　HA-GGE 双标图

采用GGE-biplot软件进行HA-GGE双标图分析[22]。将区域试验得到的产量数据整理成品种–地点两向表, 其中, 每个数值是相应品种在相应试点内性状平均值, 即为表现型值(Y_{ger})。按线性统计模型:

$$Y_{ger} = \mu + \beta_e + \lambda_1\gamma_{g1}\delta_{e1} + \lambda_2\gamma_{g2}\delta_{e2} + \rho_{ge} + \varepsilon_{ggr} \quad (5)$$

式中: λ_1 为第 1 个主成分的特征向量; γ_{g1} 为基因型 g 的第 1 个特征向量得分; δ_{e1} 为环境 e 的第 1 个特征向量得分。参数 $\sqrt{\lambda}\gamma_{g1}$ 和 $\sqrt{\lambda}\delta_{e1}$ 被分别定义为品种 g 和地点 e 的第 1 个 GGE 主成分得分, 简称为 PCA1 或 PC1。为了更精确地评价试验环境, HA-GGE 双标图中试验环境的鉴别力评价参数用近似等于试验环境向量长度的遗传力平方根表示, 代表性评价参数用近似等于试验环境向量与平均环境轴夹角的余弦值的遗传相关系数(r)表示[22]。H-定标的 GGE 双标图是按试点的遗传力平方根来权重, 遗传力高的试点在评价品种上得到较大的发言权。双标图中向量的长度代表试点的鉴别力, 它的长度与试点呈正比; 环境向量与平均环境轴的夹角大小表示试点的代表性, 它与夹角的大小呈反比。品种图标在平均环境轴上的垂足越往正方向表示品种的丰产性越好, 而以垂足引出的垂线越短表示品种的稳定性越好。

2　结果与分析

2.1　甘蔗品种产量的 AMMI 模型分析

2.1.1　蔗茎产量

联合方差分析结果(表 2)表明, 蔗茎产量在不同基因型(G)和环境(E)间存在极显著差异, 基因型和环境互作存在极显著互作效应。基因型和环境互作效应(G×E)的平方和占总平方和的 30.88%, 说明环境对蔗茎产量的影响较大, 同一品种在不同环境表现不同, 品种变异的平方和占总平方和的 16.83%, 而地点间变异的平方和占总平方和的 52.29%。从上可知, 地点间的变异远高于品种间的变异, 在总变异中占了主要的部分, 但是, 品种和地点互作效应的变异是品种间变异的 1.84 倍, 这说明品种与地点交互作用对品种合理评价有着至关重要的影响。对互作主成分得分(PCA)的显著性测验结果表明, 前 4 个乘积表达项的交互作用信息均达到极显著水平(P<0.01), PCA5 和 PCA6 也达到显著水平(P<0.05), 合计解释了 93.92 %的互作平方和。

表 2　蔗茎产量方差分析和 AMMI 模型分析结果

Table 2　Results of cane yield variance analysis (ANOVA) and AMMI model analysis

变异来源 Source of variation	自由度(df) Freedom	平方和(SS) Sum of squares	均方(MS) Mean square	F 测验 F-test	占处理 SS 比例 Proportion of treatment's SS (%)
总计 Total	428	284 697.29	665.18		
处理 Treatment	142	245 616.28	1 729.69	12.66**	
基因型(G) Genotype	10	41 328.53	4 132.85	30.24**	16.83
环境(E) Environment	12	128 429.74	10 702.48	78.32**	52.29
G×E	120	75 858.02	632.15	4.63**	30.88
PCA1	21	23 100.32	1 100.02	8.05**	9.41
PCA2	19	18 401.96	968.52	7.09**	7.49
PCA3	17	14 696.79	864.52	6.33**	5.98
PCA4	15	8 668.86	577.92	4.23**	3.53
PCA5	13	3 548.56	272.97	2.00*	1.44
PCA6	11	2 826.55	256.96	1.88*	1.15
残差 Residual	24	4 614.98	192.29		1.88
误差 Error	286	39 081.01	136.65		

*和**分别表示在 0.05 和 0.01 水平上显著, 下同。* and ** mean significant difference, respectively, at 0.05 and 0.01 level. The same below.

2.1.2　蔗糖产量

蔗糖产量的联合方差分析结果(表 3)表明: 基因型与环境间互作效应、基因型和环境分别解释了 35.83%、10.39%和 53.77%的平均产量变异, 并且全部达到极显著水平。其中, 环境的变异远高于基因型间的变异, 在总变异中占主要部分, 但基因型与环境互作效应(G×E)的变异是品种间变异的 3.45 倍。显然, 基因型与环境交互作用分析在蔗糖产量上也

表 3 蔗糖产量方差分析和 AMMI 模型分析结果

Table 3 Results of sugar yield variance analysis (ANOVA) and AMMI model analysis

变异来源 Source of variation	自由度(df) Freedom	平方和(SS) Sum of squares	均方(MS) Mean square	*F* 测验 *F*-test	占处理 SS 比例 Proportion of treatment's SS (%)
总计 Total	428	6 017.48	14.06		
处理 Treatment	142	5 113.86	36.01	11.40**	
基因型 Genotype	10	531.47	53.15	16.82**	10.39
环境 Environment	12	2 749.93	229.16	72.53**	53.77
G×E	120	1 832.46	15.27	4.83**	35.83
PCA1	21	598.91	28.52	9.03**	11.71
PCA2	19	448.00	23.58	7.46**	8.76
PCA3	17	313.53	18.44	5.84**	6.13
PCA4	15	181.90	12.13	3.84**	3.56
PCA5	13	117.08	9.01	2.85**	2.29
残差 Residual	35	173.04	4.94		3.38
误差 Error	286	903.62	3.16		

是对品种合理评价的重要环节。对互作主成分得分(PCA)的显著性测验结果表明, PCA1~PCA5 均达到极显著水平(P<0.01), 分别解释了 G×E 平方和的 32.68%、24.45%、17.11%、9.93%和 6.39%, 合计解释了 90.56%的互作平方和。

2.2 甘蔗品种产量稳定性分析

2.2.1 应用 AMMI 分析蔗茎产量的稳定性

不同品种的蔗茎产量在各试点的平均产量不同。分析结果表明(表 4), 品种蔗茎平均产量从高到低排序依次为'福农 40'、'云蔗 08-2060'、'ROC22'、

表 4 各甘蔗品种蔗茎产量和参试地点在互作主成分上的得分及稳定性参数

Table 4 Scores and stability parameters of the cane yield and test locations of sugarcane from the PCA

变量 Variable		平均产量 Mean yield (t·hm^{-2})	互作主成分 Mutual principal components							稳定性参数 (*Di*) Stability parameter
			离差 Deviation	PCA1	PCA2	PCA3	PCA4	PCA5	PCA6	
品种 Genotype	ROC22	109.68	7.04	−1.74	−1.69	0.02	1.19	3.07	−0.42	6.24
	福农 07-2020 FN07-2020	99.88	−2.77	5.54	4.20	−0.21	−2.59	2.17	−1.02	8.95
	福农 07-3206 FN07-3206	96.50	−6.15	1.71	−1.75	2.50	2.37	−0.89	−0.80	7.58
	福农 40 FN40	122.25	19.61	−0.47	3.89	2.78	−0.76	−1.83	2.76	8.21
	赣蔗 07-538 GZ07-538	89.53	−13.11	−0.58	−2.12	1.01	−2.22	−2.18	−0.63	6.98
	柳城 07-500 LC07-500	90.74	−11.90	1.32	−3.28	1.84	−1.88	−1.22	−1.88	8.16
	闽糖 02-205 MT02-505	103.90	1.26	−2.03	−2.46	1.50	−1.17	2.91	1.78	8.34
	粤甘 43 YG43	108.69	6.05	3.93	−2.46	−5.54	1.44	−0.92	1.92	9.45
	粤甘 46 YG46	104.04	1.40	−1.51	2.91	−0.64	3.70	−0.26	−2.68	7.80
	云瑞 07-1433 YR07-1433	91.31	−11.33	−5.08	1.56	−4.17	−2.67	−0.65	−0.70	8.82
	云蔗 08-2060 YZ08-2060	112.55	9.91	−1.09	1.20	0.90	2.59	−0.21	1.67	6.44
环境 Environment	福建福州 Fuzhou, Fujian	116.27	13.63	6.73	2.53	2.18	−1.98	−1.49	−0.34	8.87
	福建漳州 Zhangzhou, Fujian	123.07	20.43	0.57	0.51	−2.23	−0.03	0.89	−1.68	5.38
	广东遂溪 Suixi, Guangdong	107.88	5.24	2.35	2.06	−1.57	3.01	1.11	3.13	8.78
	广东湛江 Zhanjiang, Guangdong	138.18	35.54	−0.54	−1.75	−5.14	−3.22	−1.05	1.19	8.23
	广西百色 Baise, Guangxi	118.37	15.73	1.11	−4.41	0.38	0.98	0.21	1.82	6.57
	广西河池 Hechi, Guangxi	104.57	1.92	−0.65	−2.08	1.03	−0.32	−1.60	−1.42	6.29
	广西来宾 Laibin, Guangxi	106.84	4.20	−0.96	−2.04	0.31	−2.50	2.99	−0.37	6.88
	广西柳州 Liuzhou, Guangxi	86.62	−16.02	1.33	−3.18	1.07	1.75	−0.65	−2.02	7.52
	海南临高 Lingao, Hainan	85.35	−17.30	−1.77	3.11	−3.51	2.13	−1.77	−1.56	9.01
	云南保山 Baoshan, Yunnan	80.45	−22.19	−2.31	3.06	2.29	−3.28	−0.35	1.06	8.22
	云南开远 Kaiyuan, Yunnan	91.64	−11.00	−3.86	−0.64	2.98	1.39	−2.36	1.57	8.46
	云南临沧 Lincang, Yunnan	80.31	−22.33	0.82	0.23	0.95	1.62	1.98	−0.61	5.82
	云南德宏 Dehong, Yunnan	94.80	−7.84	−2.81	2.61	1.27	0.47	2.09	−0.77	7.42

‘粤甘 43’、‘粤甘 46’、‘闽糖 02-205’、‘福农 07-2020’、‘福农 07-3206’、‘云瑞 07-1433’、‘柳城 07-500’、‘赣蔗 07-538’，品种稳定性从强到弱依次为‘ROC22’、‘云蔗 08-2060’、‘赣蔗 07-538’、‘福农 07-3206’、‘粤甘 46’、‘柳城 07-500’、‘福农 40’、‘闽糖 02-205’、‘云瑞 07-1433’、‘福农 07-2020’、‘粤甘 43’；蔗茎产量较高且稳定性较强的品种有‘云蔗 08-2060’、‘ROC22’、‘福农 40’、‘粤甘 46’；蔗茎产量较高但稳定性较弱的品种有‘闽糖 02-205’、‘福农 07-2020’、‘粤甘 43’。

地点鉴别力较高的试点依次是 E9(海南临高)、E1(福建福州)、E3(广东遂溪)、E11(云南开远)、E4(广东湛江)和 E10(云南保山)，地点鉴别力较差的试点为 E5(广西百色)、E6(广西河池)、E12(云南临沧)和 E2(福建漳州)。

2.2.2　蔗糖产量的 AMMI 分析

从表 5 可知，品种蔗糖平均产量从高到低排序依次为‘福农 40’、‘云蔗 08-2060’、‘ROC22’、‘粤甘 43’、‘闽糖 02-205’、‘粤甘 46’、‘福农 07-2020’、‘福农 07-3206’、‘赣蔗 07-538’、‘柳城 07-500’、‘云瑞 07-1433’，品种稳定性从强到弱依次为‘闽糖 02-205’、‘云蔗 08-2060’、‘ROC22’、‘福农 40’、‘福农 07-3206’、‘柳城 07-500’、‘粤甘 43’、‘赣蔗 07-538’、‘福农 07-2020’、‘粤甘 46’、‘云瑞 07-1433’；蔗糖产量较高且稳定性较强的品种有 ‘闽糖 02-205’、‘云蔗 08-2060’、‘福农 40’、‘ROC22’，蔗糖产量较高且稳定性较弱的品种有‘粤甘 43’、‘粤甘 46’和‘福农 07-2020’。

对蔗糖产量而言，试点的分辨力较高的试点有 E1(福建福州)、E3(广东遂溪)、E4(广东湛江)、E10(云南保山)、E5(广西百色)和 E11(云南开远)；而 E6(广西河池)、E2(福建漳州)、E12(云南临沧)等 3 个试点的鉴别力较低。

表 5　各品种蔗糖产量和参试地点分别在显著的互作主成分上的得分及稳定性参数

Table 5　Scores and stability parameters of the sugar yield and test locations of sugarcane from the interaction PCA

变量 Variable		平均产量 Mean yield ($t\cdot hm^{-2}$)	互作主成分 Mutual principal components							稳定性参数 (D_i) Stability parameter
			离差 Deviation	PCA1	PCA2	PCA3	PCA4	PCA5	PCA6	
品种 Genotype	ROC22	16.01	0.82	−0.13	−0.87	0.45	0.46	1.21	3.73	3.73
	福农 07-2020 FN07-2020	14.29	−0.91	−0.64	2.28	0.26	−1.47	0.48	4.73	4.73
	福农 07-3206 FN07-3206	14.25	−0.95	−0.79	−0.06	−1.12	0.90	−0.60	3.91	3.91
	福农 40 FN40	16.81	1.61	1.10	1.33	−1.11	0.06	0.08	3.79	3.79
	赣蔗 07-538 GZ07-538	14.20	−0.99	−0.32	−0.85	−0.95	−0.74	−0.95	4.30	4.30
	柳城 07-500 LC07-500	13.78	−1.41	−0.96	−0.81	−1.08	−0.41	−0.16	3.96	3.96
	闽糖 02-205 MT02-505	15.85	0.66	0.11	−1.06	−0.28	−0.22	1.12	3.42	3.42
	粤甘 43 YG43	15.92	0.72	−2.27	0.02	1.78	0.34	−0.35	4.16	4.16
	粤甘 46 YG46	15.78	0.58	1.06	0.78	0.73	1.11	−1.02	4.83	4.83
	云瑞 07-1433 YR07-1433	13.65	−1.54	1.95	−1.12	1.27	−1.13	−0.54	5.38	5.38
	云蔗 08-2060 YZ08-2060	16.61	1.41	0.88	0.35	0.05	1.11	0.74	3.66	3.66
环境 Environment	福建福州 Fuzhou, Fujian	17.27	2.07	−1.24	2.25	−1.09	−0.80	−0.31	5.11	17.27
	福建漳州 Zhangzhou, Fujian	18.97	3.78	−0.20	0.01	0.98	−0.58	−0.22	2.75	18.97
	广东遂溪 Suixi, Guangdong	15.00	−0.19	−0.80	1.23	1.11	1.02	0.76	4.94	15.00
	广东湛江 Zhanjiang, Guangdong	19.67	4.48	−0.75	−1.08	1.56	−1.00	−0.48	4.85	19.67
	广西百色 Baise, Guangxi	17.53	2.33	−1.23	−0.91	−0.59	0.73	0.69	4.52	17.53
	广西河池 Hechi, Guangxi	15.40	0.21	−0.11	−0.67	−0.87	−0.03	−1.40	3.45	15.40
	广西来宾 Laibin, Guangxi	15.41	0.22	−0.22	−1.21	−0.40	−1.03	1.33	4.37	15.41
	广西柳州 Liuzhou, Guangxi	12.62	−2.57	−1.12	−0.59	−0.65	0.55	−0.24	3.87	12.62
	海南临高 Lingao, Hainan	11.12	−4.07	1.02	0.28	1.13	0.26	−0.69	3.94	11.12
	云南保山 Baoshan, Yunnan	13.17	−2.03	1.84	0.43	−0.81	−1.09	0.35	4.55	13.17
	云南开远 Kaiyuan, Yunnan	13.72	−1.48	1.21	−0.77	−0.79	1.12	−0.29	4.46	13.72
	云南临沧 Lincang, Yunnan	12.11	−3.09	−0.03	0.60	0.07	0.46	−0.07	2.16	12.11
	云南德宏 Dehong, Yunnan	15.55	0.35	1.63	0.44	0.35	0.40	0.57	3.91	15.55

2.3 参试品种的适应性分析

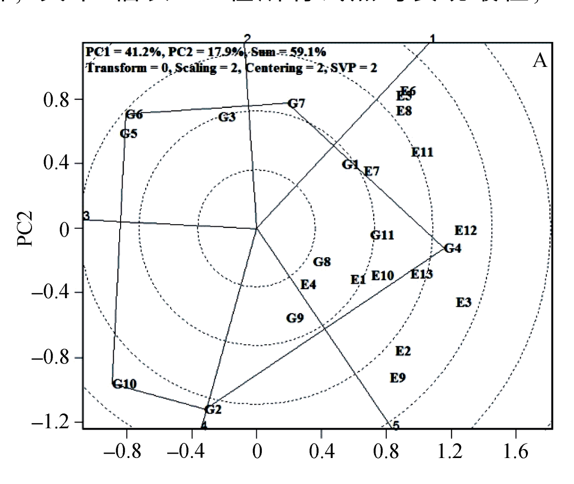
2.3.1 蔗茎产量

在分析品种的适应性图中，将最外围的品种图标依次连接，形成一个多边形，所有的品种图标会包含在多边形之中。从双标图的原点做多边形各边的垂线，将多边形划成不同的扇形区，每个扇形区内的试验环境即构成了一个试验环境组合。其中，每个扇形中多边形角上的品种就是该扇形区内各个试验环境上表现最好的品种。

图 1A 为从蔗茎产量角度的参试品种适应性分析。从图可知，多边形被划分成 5 个扇区，13 个试点全部分布在第 1 个扇区，位于该扇区的有 4 个参试品种，其中‘福农 40’在所有试点均表现最佳，‘ROC22’、‘粤甘 43’和‘云蔗 08-2060’也具有较强的适应性。

2.3.2 蔗糖产量

图 1B 为从蔗糖产量角度进行品种适应性分析。该双标图 5 个扇形区中，13 个试点分别分布在第 1、第 2 和第 3 扇区，其中 ‘ROC22’、‘闽糖 02-205’、‘粤甘 43’在广东湛江(E4)、广西百色(E5)、广西河池(E6)、广西来宾(E7)、广西柳州(E8)表现出较强的适应性，‘福农 40’和‘云蔗 08-2060’在福建福州(E1)、广东遂溪(E3)、云南开远(E11)、云南临沧(E12)表现出较强的适应性，‘粤甘 46’在福建漳州(E2)、海南临高(E9)、云南保山(E10)和云南德宏(E13)表现较强的适应性。



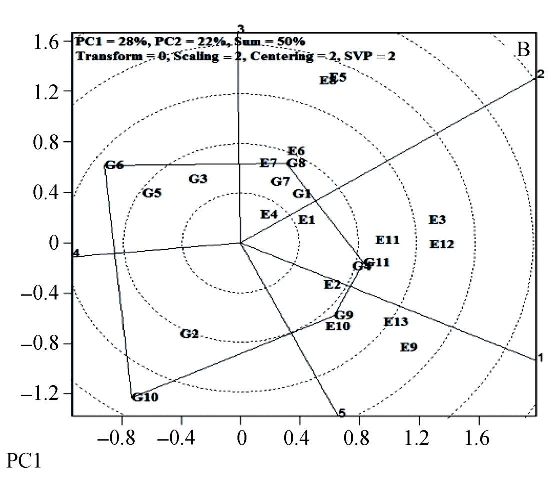


图 1 HA-GGE 双标图分析 13 个甘蔗品种的蔗茎产量(A)和蔗糖产量(B)适应性

Fig. 1 Adaptability analysis of cane yield (A) and sugar yield (B) of 13 sugarcane varieties (lines) based on HA-GGE-biplot analysis

2.4 参试品种的丰产性和稳定性

2.4.1 蔗茎产量

从图 2A 可以看出，蔗茎产量第 1 主成分解释了 41.2%的 G+GE，第 2 主成分解释了 17.9%的 G+GE，HA-GGE 双标图可以解释 G 与 GE 互作信息的 59.1%。从蔗茎产量看，‘福农 40’的丰产性最好，‘云蔗 08-2060’位居第 2，‘ROC22’位居第 3，‘粤甘 43’、‘粤甘 46’、‘闽糖 02-205’高于全试验平均产量但低于对照‘ROC22’，‘福农 07-3206’、‘福农 07-2020’、‘柳城 07-500’、‘赣蔗 07-538’、‘云瑞 07-1433’等 5 个品种产量较低，这与表 3 各品种的平均产量排序基本一致。‘云蔗 08-2060’、‘福农 40’和‘粤甘 43’等 3 个品种蔗茎产量较高，稳定性较强；‘ROC22’、‘闽糖 02-205’、‘粤甘 46’等 3 个品种蔗茎产量较高，稳定性中等；‘福农 07-3206’、‘赣蔗 07-538’、‘柳城 07-500’等 3 个品种蔗茎产量较低，稳定性中等；‘福农 07-2020’和‘云瑞 07-1433’等 2 个品种蔗茎产量较低，稳定性较差。

2.4.2 蔗糖产量

从图 2B 可以看出，蔗糖产量第 1 主成分解释了 28%的 G+GE，第 2 主成分解释了 22%的 G+GE，HA-GGE 双标图可以解释 G 与 GE 互作信息的 50%。从蔗糖产量看，‘云蔗 08-2060’、‘福农 40’、‘粤甘 46’、‘粤甘 43’等 4 个品种蔗糖产量超过对照‘ROC22’，‘闽糖 02-205’超过试验平均蔗糖产量但低于‘ROC22’，‘福农 07-3206’、‘赣蔗 07-538’、‘福农 07-2020’、‘柳城 07-500’和‘云瑞 07-1433’等 5 个品种蔗糖产量低于‘ROC22’，丰产性大小趋势与表 5 大致符合；‘福农 40’、‘云蔗 08-2060’和‘ROC22’蔗糖产量较高且稳定性较强；‘闽糖 02-205’、‘粤甘 43’蔗糖产量较高，稳定性中等；‘粤甘 46’蔗糖产量较高，稳定性较差；‘福农 07-3206’、‘赣蔗 07-538’、‘福农 07-2020’、‘柳城 07-500’、‘云瑞 07-1433’等 5 个品种蔗糖产量较低，稳定性较差。

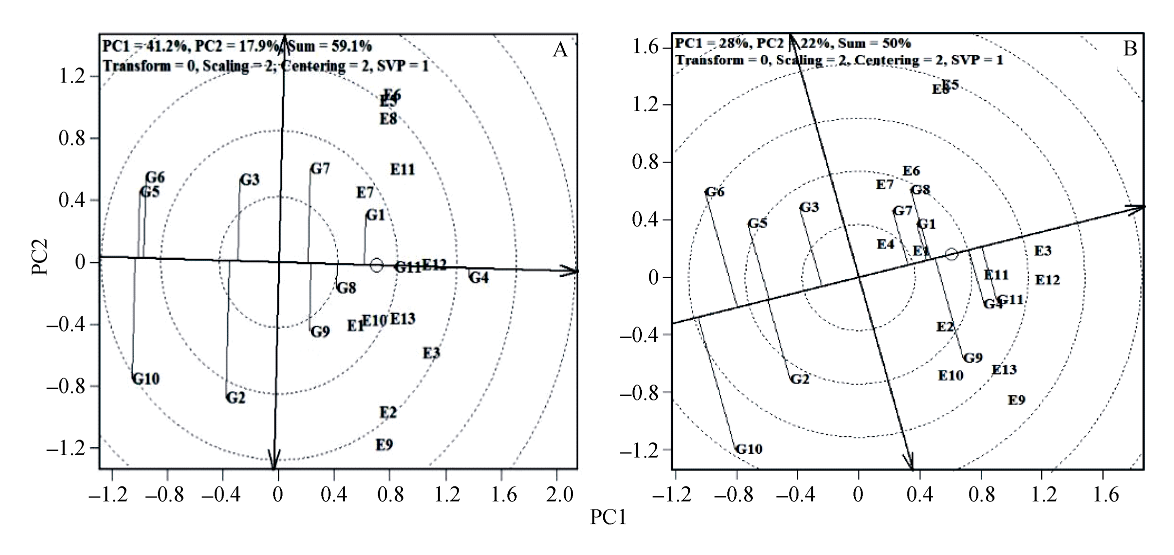


图 2　基于 **HA-GGE** 双标图分析 **13** 个甘蔗品种的蔗茎产量**(A)**和蔗糖产量**(B)**的稳定性
Fig. 2　Stabilities of cane yield (A) and sugar yield (B) of 13 sugarcane varieties (lines) based on HA-GGE-biplot analysis

2.5　试验环境的鉴别力与代表性

2.5.1　蔗茎产量

图 3 表示的是试验点的分辨力及代表性双标图, 从该图中可以评估两项关于试验环境的相关参数。图 3A 中从蔗茎产量上对试验环境的鉴别和代表性进行分析, 各试验环境的鉴别力强弱顺序为: 广东遂溪(E3)>海南临高(E9)>广西河池(E6)>云南临沧(E12)>广西百色(E5)>福建漳州(E2)>广西柳州(E8)>云南开远(E11)>云南德宏(E13)>云南保山(E10)>广西来宾(E7)>福建福州(E1)>广东湛江(E4)。试点代表性强弱顺序为: 云南临沧(E12)>云南开远(E11)>福建福州(E1)>广西来宾(E7)>广西柳州(E8)>福建漳州(E2)>广西百色(E5)>广西河池(E6)>云南临高(E9)>广东湛江(E4)>云南德宏(E13)>广东遂溪(E3)>云南保山(E10)。综合环境分辨力和代表性来看, 云南临沧的试点代表性最好并且分辨力较高。

2.5.2　蔗糖产量

图 3B 表示从蔗糖产量角度分析试验环境的分辨力和代表性, 各试验环境的鉴别力从强到弱依次为: 广西百色(E5)>广西柳州(E8)>海南临高(E9)>广东遂溪(E3)>云南临沧(E12)>云南德宏(E13)>云南开远(E11)>云南保山(E10)>广西河池(E6)>福建漳州(E2)>广西来宾(E7)>福建福州(E1)>广东湛江(E4); 代表性从强到弱依次为: 广东遂溪(E3)>云南开远(E11)>福建福州(E1)>云南临沧(E12)>福建漳州(E2)>广东湛江(E4)>云南德宏(E13)>海南临高(E9)>广西柳州(E8)>广西河池(E6)>广西百色(E5)>云南保山(E10)>广西来宾(E7)。综合来看, 广东遂溪试点的代表性最佳并且鉴别力也较好。

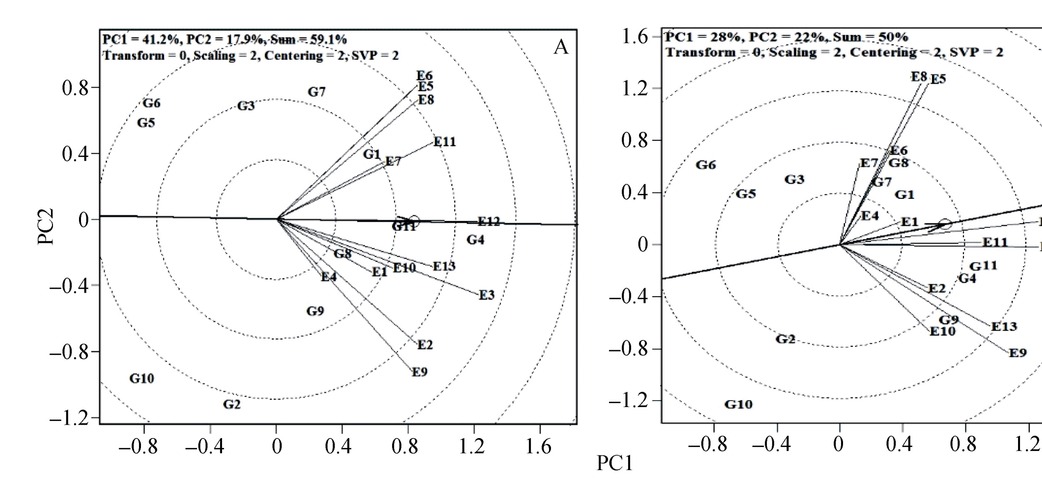


图 3　基于 **HA-GGE** 双标图分析甘蔗品种试点的蔗茎产量**(A)**和蔗糖产量**(B)**代表性及分辨力
Fig. 3　Discrimination power and representativeness of cane yield (A) and sugar yield (B) in sugarcane varieties (lines) test locations based on HA-GGE-biplot analysis

3 讨论与结论

由于基因型与环境间的互作，环境的变化对农作物的生长和产量有着重要影响[32–36]，故对作物品种区域试验数据分析中，简单的二维数据表达难以清楚表现这些因素之间关系，不仅要考虑作物的基因型，还要考虑该基因型与环境因素之间的互作效应[18]。假如区域试验数据的分析方法不够客观准确，那么即使区域试验的设计和田间管理非常完善，也很难充分发挥区域试验在作物品种推广和布局中的指导作用[37]。本研究同时采用 AMMI 模型与 HA-GGE 双标图法对 2014 年国家甘蔗品种区域试验新植数据进行分析评估，两种模型优势互补，在品种的丰产性、稳定性以及试点的代表性的分析结果基本一致，所获得的结论应该是比较科学、客观合理的。

甘蔗育种的两个主要目标是丰产和高糖[18]，但产量和糖分往往是矛盾的，往往是高产低糖或低产高糖，为平衡蔗糖分和蔗茎产量，将蔗糖产量作为评价甘蔗品种优劣的最终标准[4]。本试验从甘蔗蔗茎产量与蔗糖产量这两个方面来分析参试品种的丰产性与稳产性，AMMI 模型侧重于分析品种与试点的互作效应，侧重于稳定性分析。本试验中，从蔗茎产量分析，稳定性最好的是‘ROC22’，其次为‘云蔗 08-2060’；从蔗糖产量分析，稳定性最好的是‘闽糖 02-205’，其次为‘云蔗 08-2060’。而 HA-GGE 双标图侧重于从品种的适应性和丰产性进行分析。本试验中，从蔗茎产量分析‘福农 40’具有广适应性，‘ROC22’、‘粤甘 43’和‘云蔗 08-2060’具有较强的适应性；从蔗糖产量分析，‘ROC22’、‘闽糖 02-205’、‘粤甘 43’在广东湛江(E4)等 5 个试点表现出较强的适应性，‘福农 40’和‘云蔗 08-2060’在福建福州(E1)等 4 个试点表现出较强的适应性；从蔗茎产量分析‘福农 40’的丰产性最好，‘云蔗 08-2060’位居第 2，从蔗糖产量分析‘云蔗 08-2060’、‘福农 40’、‘粤甘 46’、‘粤甘 43’等 4 个品种蔗糖产量较高。综合 HA-GGE 双标图和 AMMI 模型分析结果，‘福农 40’的蔗茎产量和蔗糖产量最高，其次是‘云蔗 08-2060’；‘云蔗 08-2060’和‘福农 40’蔗茎产量和蔗糖产量的稳定性均较强。‘粤甘 43’和‘粤甘 46’的蔗茎产量和蔗糖产量表现处于所有参试品种的中上水平，为产量较高稳定性中等的品种。综合来说，‘福农 40 号’、‘粤甘 43 号’、‘粤甘 46 号’和‘云蔗 08-2060’均具有较强的适应性，可在适宜蔗区推广应用。在不同生态环境条件下，最理想的甘蔗品种是高产、稳产，同时具有广泛适应性，但在实际生产上，这种品种十分少见，而对于低产品种，即使其稳定性很强，也无法大面积推广[6,18,36,38]。可见甘蔗品种的稳定性一定要和高产相结合时才有意义，综合采用 AMMI 模型与 HA-GGE 双标图可以方便快捷地分析品种的丰产性、适应性和稳定性，为品种的科学布局提供可靠依据。

正确选择试验地点对作物育种工作非常重要[38]。从蔗茎产量相关数据分析来看，广东遂溪的环境鉴别力最强，其次是海南临高和广西河池；地点代表性最强的是云南临沧，其次是云南开远和福建福州。从蔗糖产量的相关分析来看，环境鉴别力以广西百色最强，其次是广西柳州和海南临高；地点代表性居前几位的分别是广东遂溪、云南开远、福建福州和云南临沧。从蔗茎产量和蔗糖产量这两个不同的性状分析得出的环境鉴别力和地点代表性结果是有差别的，其原因可能是不同性状由不同基因控制，而不同基因又与相同的环境有着大小不一的作用程度，或者说不同基因受相同环境的影响程度不同，相同地点的鉴别力在不同基因控制的性状上也就存在差异[39]。

需要强调的是，在实际农业生产和育种工作中，很难有品种在拥有高产性的同时又拥有较强的稳产性，两者间完美结合的概率很小，只有在高产前提下的稳产品种才适宜广泛种植[35]。本研究分析筛选出的‘福农 40’和‘云蔗 08-2060’两个甘蔗品种，蔗茎产量和含糖量高，稳定性强，属于高产稳产型甘蔗品种，在生产实际中可能具有较高的应用价值，建议作为广适性品种推荐各地应用。

致谢 本研究引用 2014 年国家第 10 轮品种区域试验新植季资料，在此谨向各参加区试工作的单位和人员致以谢意。

参考文献 References

[1] 张群远，孔繁玲，廖琴，等. 作物品种区域试验的评价体系及评价方法[J]. 农业系统科学与综合研究，2000, 16(2): 81–86
Zhang Q Y, Kong F L, Liao Q, et al. Evaluation system and methods for regional crop trials[J]. System Sciences and Comprehensive Studies in Agriculture, 2000, 16(2): 81–86

[2] 吴媛媛，周健，包晓婷，等. 基因型和环境对小麦类胡萝卜素含量及其品质性状的影响[J]. 麦类作物学报, 2015, 35(9): 1257–1261
Wu Y Y, Zhou J, Bao X T, et al. Effect of genotypes and environments to carotenoid contents and some quality traits of wheat varieties[J]. Journal of Triticeae Crops, 2015, 35(9): 1257–1261

[3] 李辛村，张恩和，董孔军，等. 用 AMMI 双标图分析糜子品种的产量稳定性及试点代表性[J]. 中国生态农业学报，

2012, 20(4): 422–426
Li X C, Zhang E H, Dong K J, et al. AMMI-Biplot analysis of yield stability and test-site representativeness of proso-millet cultivars[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2012, 20(4): 422–426

[4] Yan W K, Pageau D, Frégeau-Reid J, et al. Assessing the representativeness and repeatability of test locations for genotype evaluation[J]. Crop Science, 2011, 51(4): 1603–1610

[5] Badu-Apraku B, Akinwale R O, Obeng-antwi K, et al. Assessing the representativeness and repeatability of testing sites for drought-tolerant maize in West Africa[J]. Canadian Journal of Plant Science, 2013, 93(4): 699–714

[6] Luo J, Pan Y B, Xu L P, et al. Cultivar evaluation and essential test locations identification for sugarcane breeding in China[J]. Scientific World Journal, 2014, 2014: Article ID, 302753

[7] 陈如凯, 许莉萍, 林彦铨, 等. 现代甘蔗遗传育种[M]. 北京: 中国农业出版社, 2011: 400–508
Chen R K, Xu L P, Lin Y Q, et al. Modern Sugarcane Genetic Breeding[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2011: 400–508

[8] Çalişkan M E, Söğüt T, Boydak E, et al. Growth, yield, and quality of sweet potato [*Ipomoea batatas* (L.) Lam.] cultivars in the southeastern Anatolian and east Mediterranean regions of turkey[J]. Turkish Journal of Agriculture and Forestry, 2007, 31(4): 213–227

[9] Abidin P E, van Eeuwijk F A, Stam P, et al. Adaptation and stability analysis of sweet potato varieties for low-input systems in Uganda[J]. Plant Breeding, 2005, 124(5): 491–497

[10] Caliskan M E, Erturk E, Sogut T, et al. Genotype× environment interaction and stability analysis of sweet potato (*Ipomoea batatas*) genotypes[J]. New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science, 2007, 35(1): 87–99

[11] Crossa J, Fox P N, Pfeiffer W H, et al. AMMI adjustment for statistical analysis of an international wheat yield trial[J]. Theoretical and Applied Genetics, 1991, 81(1): 27–37

[12] 常磊, 柴守玺. AMMI 模型在旱地春小麦稳定性分析中的应用[J]. 生态学报, 2006, 26(11): 3677–3684
Chang L, Chai S X. Application of AMMI model in the stability analysis of spring wheat in rainfed areas[J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(11): 3677–3684

[13] 刘文江, 李浩杰, 汪旭东, 等. 用 AMMI 模型分析杂交水稻基本性状的稳定性[J]. 作物学报, 2002, 28(4): 569–573
Liu W J, Li H J, Wang X D, et al. Stability analysis for elementary characters of hybrid rice by AMMI model[J]. Acta Agronomica Sinica, 2002, 28(4): 569–573

[14] 刘旭云, 谢永俊, 杨德, 等. AMMI 模型应用于油菜区域试验的分析研究[J]. 西南农业学报, 2001, 14(2): 27–30
Liu X Y, Xie Y J, Yang D, et al. Analysis and research of AMMI model for rape varieties regional trials[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2001, 14(2): 27–30

[15] 罗俊, 袁照年, 张华, 等. 宿根甘蔗产量性状的稳定性分析[J]. 应用与环境生物学报, 2009, 15(4): 488–494
Luo J, Yuan Z N, Zhang H, et al. Stability analysis on yield characters of sugarcane ratoon[J]. Chinese Journal of Applied & Environmental Biology, 2009, 15(4): 488–494

[16] 徐良年, 高三基, 邓祖湖, 等. AMMI 模型在甘蔗区域试验中的应用[J]. 江西农业大学学报, 2004, 26(5): 735–739
Xu L N, Gao S J, Deng Z H, et al. Application of AMMI model in data analysis of regional trial of sugarcane[J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2004, 26(5): 735–739

[17] Luo J, Pan Y B, Xu L P, et al. Rational regional distribution of sugarcane cultivars in China[J]. Scientific Reports, 2015, 5: 15721

[18] 罗俊, 张华, 邓祖湖, 等. 用 GGE 双标图分析甘蔗品种性状稳定性及试点代表性[J]. 应用生态学报, 2012, 23(5): 1319–1325
Luo J, Zhang H, Deng Z H, et al. Trait stability and test site representativeness of sugarcane varieties based on GGE-biplot analysis[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(5): 1319–1325

[19] 严威凯, 盛庆来, 胡跃高, 等. GGE 叠图法——分析品种×环境互作模式的理想方法[J]. 作物学报, 2001, 27(1): 21–28
Yan W K, Sheng Q L, Hu Y G, et al. GGE biplot — An ideal tool for studying genotype by environment interaction of regional yield trial data[J]. Acta Agronomica Sinica, 2001, 27(1): 21–28

[20] 严威凯. 双标图分析在农作物品种多点试验中的应用[J]. 作物学报, 2010, 36(11): 1805–1819
Yan W K. Optimal use of biplots in analysis of multi-location variety test data[J]. Acta Agronomica Sinica, 2010, 36(11): 1805–1819

[21] Yan W K, Hunt L A, Sheng Q L, et al. Cultivar evaluation and mega-environment investigation based on the GGE biplot[J]. Crop Science, 2000, 40(3): 597−605

[22] Yan W K, Holland J B. A heritability-adjusted GGE Biplot for test environment evaluation[J]. Euphytica, 2010, 171(3): 355–369

[23] Yan W K. GGEbiplot — A windows application for graphical analysis of multienvironment trial data and other types of two-way data[J]. Agronomy Journal, 2001, 93(5): 1111–1118

[24] Yan W K. Methodology of cultivar evaluation based on yield trial data-with special reference to winter wheat in Ontario[D]. Guelph: University of Guelph, 1999

[25] Yan W K, Hunt L A. Biplot analysis of diallel data[J]. Crop Science, 2002, 42(1): 21–30

[26] 金石桥, 许乃银. GGE 双标图在中国农作物品种试验中应用的必要性探讨[J]. 种子, 2012, 31(12): 89–92
Jin S Q, Xu N Y. The discuss of necessity about GGE double labeling chart applied in crop variety experiment in China[J]. Seed, 2012, 31(12): 89–92

[27] Gauch Jr H G, Piepho H P, Annicchiarico P. Statistical analysis of yield trials by AMMI and GGE: Further considerations[J]. Crop Science, 2008, 48(3): 866–889

[28] Yan W K, Kang M S, Ma B L, et al. GGE biplot vs. AMMI analysis of genotype-by-environment data[J]. Crop Science, 2007, 47(2): 643–653

[29] 罗俊, 许莉萍, 邱军, 等. 基于 HA-GGE 双标图的甘蔗试验环境评价及品种生态区划分[J]. 作物学报, 2015, 41(2): 214–227

Luo J, Xu L P, Qiu J, et al. Evaluation of sugarcane test environments and maga-environment investigation based on HA-GGE biplot[J]. Acta Agronomica Sinica, 2015, 41(2): 214–227
[30] Akinwale R O, Fakorede M A B, Badu-Apraku B, et al. Assessing the usefulness of GGE biplot as a statistical tool for plant breeders and agronomists[J]. Cereal Research Communications, 2014, 42(3): 534–546
[31] 唐启义. DPS 数据处理系统——实验设计、统计分析及数据挖掘[M]. 2 版. 北京: 科学出版社, 2010
Tang Q Y. DPS Data Processing System — Experimental Design, Statistical Analysis and Data Mining[M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2010
[32] Giauffret C, Lothrop J, Dorvillez D, et al. Genotype×environment interactions in maize hybrids from temperate or highland tropical origin[J]. Crop Science, 2000, 40(4): 1004–1012
[33] Rao P S, Reddy P S, Rathore A, et al. Application GGE biplot and AMMI model to evaluate sweet sorghum (*Sorghum bicolor*) hybrids for genotype×environment interaction and seasonal adaptation[J]. Indian Journal of Agricultural Sciences, 2011, 81(5): 438–444
[34] 许乃银, 张国伟, 李健, 等. 基于 GGE 双标图的棉花品种生态区划分[J]. 应用生态学报, 2013, 24(3): 771–776
Xu N Y, Zhang G W, Li J, et al. Ecological regionalization of cotton varieties based on GGE biplot[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(3): 771–776
[35] 罗俊, 张华, 阙友雄. 甘蔗品种主要性状的基因型与环境及其互作效应分析[J]. 热带亚热带植物学报, 2012, 20(5): 445–454
Luo J, Zhang H, Que Y X. Genotype, environment and their interactive effects on main traits of sugarcane varieties[J]. Journal of Tropical and Subtropical Botany, 2012, 20(5): 445–454
[36] 罗俊, 张华, 邓祖湖, 等. 应用 GGE 双标图分析甘蔗品种(系)的产量和品质性状[J]. 作物学报, 2013, 39(1): 142–152
Luo J, Zhang H, Deng Z H, et al. Analysis of yield and quality traits in sugarcane varieties (lines) with GGE-Biplot[J]. Acta Agronomica Sinica, 2013, 39(1): 142–152
[37] 聂迎彬, 穆培源, 桑伟, 等. AMMI 模型和 GGE 双标图法在新疆冬小麦区域试验产量分析上的应用[J]. 新疆农业科学, 2012, 49(9): 1569–1575
Nie Y B, Mu P Y, Sang W, et al. Application of AMMI model and GGE-biplot for yield analysis in the Xinjiang regional trials of winter wheat[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2012, 49(9): 1569–1575
[38] Luo J, Pan Y B, Que Y X, et al. Biplot evaluation of test environments and identification of mega-environment for sugarcane cultivars in China[J]. Scientific Reports, 2015, 5: 15505
[39] 陈学宽, 刘家勇, 赵培方, 等. 云南省甘蔗品种区域试验的基因与环境互作分析[J]. 西南农业学报, 2014, 27(4): 1387–1392
Chen X K, Liu J Y, Zhao P F, et al. Analysis of genotype×environment interactive of sugarcane regional trial of Yunnan[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2014, 27(4): 1387–1392